



TESIS DE DOCTORADO

**DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES  
MECÁNICAS Y DE FRACTURA EN  
MADERA DE EUCALYPTUS GLOBULUS  
PARA ANÁLISIS MEDIANTE SIMULACIÓN  
NUMÉRICA**

Jorge Crespo Outes

ESCUELA DE DOCTORADO INTERNACIONAL

PROGRAMA DE DOCTORADO EN INGENIERÍA PARA EL DESARROLLO RURAL Y CIVIL

LUGO

2020



**DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS Y DE  
FRACTURA EN MADERA DE EUCALYPTUS GLOBULUS PARA  
ANÁLISIS MEDIANTE SIMULACIÓN NUMÉRICA**

**D. Jorge Crespo Outes**

*Presento mi tesis, siguiendo el procedimiento adecuado al Reglamento y*

**DECLARO:**

- *La tesis abarca los resultados de la elaboración de mi trabajo.*
- *De ser el caso, en la tesis se hace referencia a las colaboraciones que tuvo este trabajo.*
- *La tesis es la versión definitiva presentada para su defensa y coincide con la versión enviada en formato electrónico.*
- *Confirmando que la tesis no incurre en ningún tipo de plagio de otros autores ni de trabajos presentados por mí para la obtención de otros títulos.*

En LUGO, a 17 de diciembre de 2020

Fdo. D. Jorge Crespo Outes



**DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS Y DE  
FRACTURA EN MADERA DE EUCALYPTUS GLOBULUS PARA  
ANÁLISIS MEDIANTE SIMULACIÓN NUMÉRICA**

**D. Manuel Guaita Fernández**

**Dña. Almudena Majano Majano**

**INFORMAMOS:**

*Que la presente tesis, se corresponde con el trabajo realizado por D. **Jorge Crespo Outes**, bajo nuestra dirección, y autorizamos su presentación, considerando que reúne los requisitos exigidos en el Reglamento de Estudios de Doctorado de la USC, y que como directores de esta no incurre en las causas de abstención establecidas en la Ley 40/2015.*

*De acuerdo con el artículo 37 del Reglamento de Estudios de Doctorado, declaramos también que la presente tesis doctoral es idónea para ser defendida en base a la modalidad de COMPENDIO DE PUBLICACIONES, en los que la participación del doctorando fue decisiva para su elaboración y las publicaciones se ajustan al Plan de Investigación.*

En LUGO, a 17 de diciembre de 2020

Fdo. D. Manuel Guaita Fernández

Fdo. Dña. Almudena Majano Majano



## AGRADECIMIENTOS

La primera persona a la que quiero dedicar mi más profundo agradecimiento es a mi amigo y director de esta Tesis Doctoral Manuel Guaita. Él no solo fue uno de mis guías en la elaboración de este trabajo de investigación, sino que también fue la persona que cambiaría mi vida profesional para siempre con una llamada a las 22:30 h proponiéndome iniciar una aventura en PEMADE donde, durante 9 años maravillosos, pude desarrollarme y adquirir gran parte de las capacidades y conocimientos que me permitieron, gracias a su apoyo incondicional, formar parte del equipo de FINSA. No podría dejar pasar esta oportunidad para reconocer su incansable labor y generosidad en la búsqueda de un futuro profesional tanto para mi como para mis compañeros de PEMADE. ¡Te quiero Manolo!

Quiero agradecer también el trabajo y ayuda de mi directora Almudena Majano quién me enseñó como es el mundo de las publicaciones científicas, el apasionante campo de la mecánica de fractura y, sobre todo, como mis ganas de hacer las cosas bien todavía tiene un nivel superior que eres tú. ¡Muchas gracias Almudena!

Nada de esto sería igual sin el apoyo desinteresado de mis compañeros de PEMADE. Muchas horas de trabajo, de risas, de consejos, de ánimos, de fiestas y de tantas cosas que hicieron que tanto la realización de esta Tesis Doctoral como mi paso por PEMADE fuera una experiencia inolvidable. ¡Gracias a María Portela, a Antonio Lara, a Belén Feijoo, a José Antonio Lorenzana, a Rubén Regueira y a todos los que han pasado de forma temporal por el laboratorio!

Me gustaría agradecer el trabajo realizado por los coautores de los artículos que dan sentido a esta Tesis Doctoral. Muchas horas de dedicación, mucha pasión y sobre todo mucho esfuerzo, dando cada uno de vosotros lo mejor de sí para hacer que esta investigación tuviera la máxima calidad posible. ¡A todos vosotros muchas gracias!

Aunque su participación no fue de forma directa, sin su ayuda y su eterna comprensión este trabajo no hubiera salido adelante. Mi agradecimiento más especial es para mi mujer Meri y mi hija Daniela. Muchas horas robadas a nuestro tiempo, un paseo que nunca llegaba porque después de trabajar tocaba “estudiar”; cuando un “¿papi hoy también tienes que estudiar?” o un “¿papi hoy juegas conmigo?” tenían una respuesta afirmativa a la primera y negativa a la segunda, rompiéndoseme en mil pedazos el corazón al verle la cara sin entender nada. Agradecido también le estoy a la vida por haberme permitido hacer mi camino junto a vosotras. ¡Os quiero mucho!

Como no puede ser de otra manera, quiero agradecer a mis padres y a mis hermanos por hacer de mi lo que soy hoy en día; por inculcarme la necesidad de estudiar, por demostrarme que sin esfuerzo no hay nada y sobre todo por poner los medios para que todo ello fuera posible. ¡Os quiero!

¡A todos, muchas gracias por haberme acompañado hasta aquí!





## ÍNDICE

RESUMEN .....	11
RESUMO .....	13
ABSTRACT .....	15
1. INTRODUCCIÓN .....	17
2. OBJETIVOS .....	25
3. METODOLOGÍA .....	27
4. DISCUSIÓN GENERAL .....	31
5. CONCLUSIONES .....	37
6. BIBLIOGRAFÍA .....	39
7. PUBLICACIONES .....	45
7.1. <i>Artículo I: Comparative analysis of the elastic constants measured by conventional, ultrasound and 3D digital image correlation methods in <i>Eucalyptus globulus</i> Labill.....</i>	45
7.2. <i>Artículo II: Mechanical properties of small clear specimens of <i>Eucalyptus globulus</i> Labill.....</i>	45
7.3. <i>Artículo III: Determination of the resistance-curve in <i>Eucalyptus globulus</i> through double cantilever beam tests.....</i>	45



## RESUMEN

En las regiones de influencia Atlántica del sur de Europa, existe una extensa área de plantaciones de *Eucalyptus globulus* Labill. (eucalipto blanco) localizadas especialmente en Galicia (España) y en Portugal.

Actualmente, las principales aplicaciones del *Eucalyptus globulus* L. son el suministro de madera con fines energéticos y de fibra para la industria de la celulosa. Sin embargo, la madera de *E. globulus* posee unas excelentes propiedades mecánicas, estando caracterizada estructuralmente como D40, la mayor clase resistente asignada a especies con crecimiento en territorio europeo. Esto, sumado a la alta tasa de crecimiento que redunda en unos turnos de transformación reducidos en comparación con la mayoría de frondosas, hace del *E. globulus* una especie de gran potencial para aplicaciones estructurales y el desarrollo de nuevos productos.

Con esta finalidad, los procesos de diseño y modelado estructural, junto con los asociados al material que impliquen el desarrollo de modelos numéricos mediante elementos finitos, requieren incorporar una completa y precisa descripción de un conjunto de propiedades de la madera a nivel macroscópico. Estas propiedades son caracterizadas habitualmente mediante ensayos con probetas pequeñas libres de defectos.

La presente Tesis Doctoral contribuye aportando, por primera vez, el valor de las principales propiedades del *Eucalyptus globulus* L. en madera libre de defectos necesarias para dichos modelos numéricos. En concreto, se determinan experimentalmente las constantes elásticas del material, las propiedades mecánicas de resistencia y rigidez ante diferentes esfuerzos y orientaciones de fibra, así como los coeficientes de rozamiento estático madera-madera y las propiedades de fractura. Estos últimos son necesarios en situaciones particulares donde exista contacto entre superficies o pueda generarse un fallo frágil, respectivamente, como sucede por ejemplo en el diseño de diferentes tipos de uniones.

Los resultados experimentales obtenidos ponen de manifiesto las elevadas prestaciones del *E. globulus*, ampliando la posibilidad de explotación de esta especie como materia prima para nuevas aplicaciones que generen un mayor valor añadido.

**PALABRAS CLAVE:** *Eucalyptus globulus* L., constantes elásticas, ensayos mecánicos, ultrasonidos, DIC, propiedades mecánicas, rozamiento, curva-R, energía de fractura, elementos finitos.



## RESUMO

Nas rexións de influencia Atlántica do sur de Europa, existe unha extensa área de plantacións de *Eucalyptus globulus* Labill. (eucalipto branco) localizadas especialmente en Galicia (España) e en Portugal.

Actualmente, as principais aplicacións do *Eucalyptus globulus* L. son o subministro de madeira con fins enerxéticos e de fibra para a industria da celulosa. Sen embargo, a madeira de *E. globulus* posúe unhas excelentes propiedades mecánicas, estando caracterizada estruturalmente como D40, a maior clase resistente asignada a especies con crecemento en territorio europeo. Isto, sumado á alta taxa de crecemento que redonda en quendas de transformación reducidas en comparación ca maioría das frondosas, fai do *E. globulus* unha especie de gran potencial para aplicacións estruturais e o desenvolvemento de novos produtos.

Con esta finalidade, os procesos de deseño e modelado estrutural, xunto cos asociados ó material que impliquen o desenvolvemento de modelos numéricos mediante elementos finitos, requiren incorporar unha completa e precisa descrición dun conxunto de propiedades da madeira a nivel macroscópico. Estas propiedades son caracterizadas habitualmente mediante ensaios con probetas pequenas libres de defectos.

A presente Tese Doutoral contribúe aportando, por primeira vez, o valor das principais propiedades do *Eucalyptus globulus* L. en madeira libre de defectos necesarias para devanditos modelos numéricos. En concreto, determináronse experimentalmente as constantes elásticas do material, as propiedades mecánicas de resistencia e rixidez ante diferentes esforzos e orientacións da fibra, así como os coeficientes de rozamento estáticos madeira-madeira e as propiedades de fractura. Estes últimos son necesarios en situacións particulares onde exista contacto entre superficies e poida xerarse un fallo fráxil, respectivamente, como sucede por exemplo no deseño de diferentes tipos de unións.

Os resultados experimentais obtidos poñen de manifesto as elevadas prestacións do *E. globulus*, ampliando a posibilidade de explotación desta especie como materia prima para novas aplicacións que xeren un maior valor engadido.

**PALABRAS CHAVE:** *Eucalyptus globulus* L., constantes elásticas, ensaios mecánicos, ultrasóns, DIC, propiedades mecánicas, rozamento, curva-R, enerxía de fractura, elementos finitos.



## ABSTRACT

In the regions of Atlantic influence of southern Europe, there is an extensive area of *Eucalyptus globulus* Labill. plantations (white eucalyptus) located especially in Galicia (Spain) and Portugal.

Currently, the main applications of *Eucalyptus globulus* L. are the supply of wood for energy purposes and as raw-material for the pulp industry. However, *E. globulus* wood shows excellent mechanical properties, being structurally characterized as D40, the highest strength class assigned to growing species in Europe. This fact, added to the high growth rate that results in reduced transformation shifts compared to most hardwoods, makes *E. globulus* a species with great potential for structural applications and new products development.

To this end, material and structural modelling and design processes that involve the development of reliable finite element-based models, require a full description of the timber properties at a macroscopic level. These properties are usually characterized by testing small clear specimens.

This Doctoral Thesis contributes by providing, for the first time, the value of the main properties of clear wood from *Eucalyptus globulus* L. necessary for such numerical modelling. Specifically, the orthotropic elastic constants of the material, the strength and stiffness properties considering different stresses and grain orientations, as well as the static friction coefficients and the fracture properties are experimentally determined. The latter are necessary in particular situations with timber surfaces in contact or where a brittle failure can take place, as happens for example in the design of different types of joints.

The experimental results confirm the high mechanical performance of *E. globulus*, expanding the possibility of using this species as raw material for new applications with greater added value.

**KEYWORDS:** *Eucalyptus globulus* L., orthotropic elastic constants, mechanical tests, ultrasound, DIC, mechanical properties, friction, R-curve, fracture energy, FEM.





## 1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la construcción con madera está experimentando un fuerte crecimiento debido fundamentalmente a la presencia de importantes demandas políticas y sociales relacionadas con el uso de materiales más respetuosos con el medio ambiente y que contribuyan a reducir los efectos del cambio climático. En este sentido, la madera aporta múltiples ventajas, entre las que destacan las condiciones de material renovable y reciclable, siendo su fabricación completamente natural, empleando para ello agua, minerales, energía solar y, lo más importante, dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Es por ello que la madera actúa como sumidero de CO<sub>2</sub> tanto en las fases de crecimiento del árbol como en su transformación posterior.

Es en este contexto de expansión de la construcción con madera, las especies frondosas están adquiriendo un protagonismo creciente en el ámbito de las aplicaciones estructurales, debido fundamentalmente a que en general poseen propiedades mecánicas superiores a las especies coníferas más utilizadas, como son el abeto y el pino. Otros factores que potencian el uso de las especies frondosas en el desarrollo de productos estructurales son el stock existente tanto en el centro como en el sur de Europa, así como la disminución de existencias de coníferas que tiene como consecuencia un incremento en su precio (Aicher *et al.*, 2014).

En este sentido, las principales especies frondosas empleadas actualmente en Europa para la fabricación de productos estructurales son el roble, el castaño y el haya. Con ellas se comercializan diferentes productos laminados (ETA-13/0646, ETA-13/0642 y Z-9.1-679) así como microlaminados en el caso del haya (ETA-14/0354).

Una especie frondosa con crecimiento en el sur de Europa de gran potencial para el desarrollo de productos estructurales es el *Eucalyptus globulus* Labill. Es originario de Australia, donde se encuentra formando importantes masas forestales naturales. Sin embargo, su cultivo es también extendido en diferentes países de todo el mundo, como Chile, Argentina, España y Portugal, debido fundamentalmente a la alta rentabilidad que supone su rápido crecimiento (crecimiento medio en Galicia de 20 m<sup>3</sup>/ha/año según Álvarez *et al.*, 2005).

En la actualidad, es una de las especies forestales maderables más importante de la península Ibérica y más concretamente en la comunidad de Galicia. Los principales usos a los que se destina su madera son la generación de energía a partir de biomasa y como fuente de fibra para la industria de la celulosa.

Sin embargo, la madera de *E. globulus* de procedencia gallega manifiesta una buena durabilidad natural frente a hongos (Clase 2 según UNE-EN 350:2016), superior al haya y comparable con especies reconocidas por esta característica como el roble o el castaño. Esta

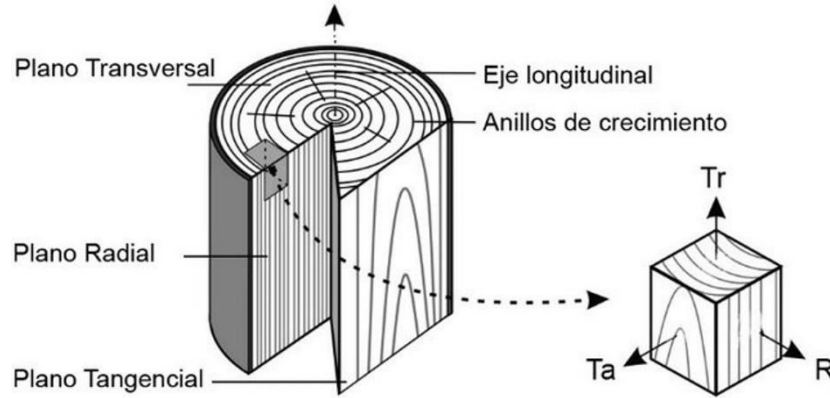
cualidad permite el uso de esta especie en situaciones de exterior, tanto para uso estructural como en otras aplicaciones constructivas.

Desde un punto de vista mecánico, el *Eucalyptus globulus* L. presenta excelentes propiedades. Estudios previos llevados a cabo por Fernández-Golfín *et al.* (2007) en *E. globulus* español, reportan valores medios de resistencia y módulo de elasticidad a flexión y densidad de 91,97 MPa, 18,43 GPa y 797 kg/m<sup>3</sup> respectivamente. A partir de estos estudios, se adoptaron los criterios de clasificación visual adoptados por la norma española UNE 56546:2013 así como la información necesaria para la inclusión de esta especie en la norma europea EN 1912:2012. Según esto, el *Eucalyptus globulus* L. de procedencia española presenta una única clase visual definida como MEF y se le asigna la clase resistente D40 (EN 338:2017), siendo ésta la misma clase resistente que el *Fraxinus excelsior* L. (fresno) y *Fagus sylvatica* L. (haya) de origen alemán caracterizados visualmente con la clase LS13 de acuerdo con la DIN 4047-5:2008. Se trata por tanto de las tres especies frondosas con crecimiento en Europa de mayores propiedades mecánicas caracterizadas estructuralmente.

Según lo anterior, *E. globulus* ofrece grandes cualidades para su utilización en nuevos productos estructurales de gran valor añadido y altas prestaciones mecánicas, como se ha puesto de manifiesto en diversas investigaciones recientes al respecto (p. ej. López-Suevos y Richter (2009), Franke y Marto (2014), Lara-Bocanegra *et al.* (2017), Derikvand *et al.* (2018), Derikvand *et al.* (2019), Pangh *et al.* (2019), Kotlarewski *et al.* (2019), Lara-Bocanegra *et al.* (2020) y Martins *et al.* (2020)). Estas investigaciones llevan asociadas importantes campañas experimentales utilizando especímenes de tamaño estructural.

Las campañas experimentales con elementos de tamaño estructural suponen un consumo elevado de tiempo y recursos económicos. Una alternativa factible es el desarrollo de modelos numéricos de elementos finitos que simulen de modo adecuado el comportamiento del material a nivel macroscópico (Schmidt y Kaliske, 2009). Por tanto, es imprescindible que estos modelos incorporen una descripción completa del conjunto de propiedades del material, las cuales son derivadas habitualmente de ensayos de caracterización en probeta pequeña libre de defectos. Conocer estas propiedades también resulta valioso en el proceso de diseño de estructuras de madera, pues permite la comparativa de estos valores entre diferentes especies.

Aunque la madera es un material anisotrópico, se acepta su asimilación a un material ortótropo donde sus tres direcciones principales se corresponden con las orientaciones longitudinal (L), radial (R) y tangencial (T) de acuerdo con su constitución anatómica (Fig. 1). Es por ello que la madera presenta propiedades de resistencia y rigidez completamente diferentes en cada una de estas direcciones.



*Fig. 1. Direcciones principales de la madera (Feijoo et al., 2018)*

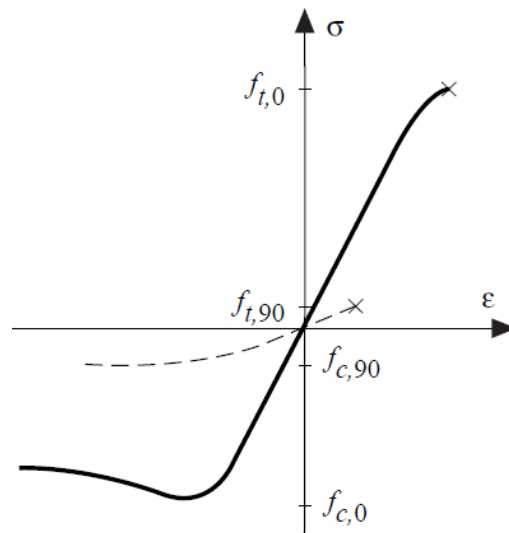
Para situaciones con bajos niveles de deformación alejados de la carga de rotura, resulta adecuado suponer un modelo elástico y lineal del material en las tres direcciones (Gibson y Ashby, 2001). Sin embargo, para estimar la carga última de elementos estructurales, el modelo elástico y lineal puede no resultar apropiado pues pueden producirse fenómenos de plastificación y/o roturas frágiles cuando se supera un cierto nivel de deformación.

La evaluación del comportamiento en régimen elástico-lineal para las diferentes orientaciones de la madera en probeta pequeña libre de defectos, requiere de la determinación de las 12 constantes elásticas del material que componen su matriz de rigidez. Sin embargo, aplicando la condición de simetría de la matriz, estas constantes se reducen a 9 parámetros independientes formados por 3 módulos de elasticidad longitudinal, 3 módulos de elasticidad transversal y 3 coeficientes de Poisson (los fundamentos teóricos sobre la elasticidad ortotrópica en madera pueden consultarse en Bodig y Jayne, 1982).

La matriz de flexibilidad  $[S]$  (Eq. 1), derivada de la inversa de la matriz de rigidez  $[C]$ , está formada en su diagonal principal por los valores inversos de los tres módulos de elasticidad longitudinales y los tres módulos de elasticidad transversales. Los términos de fuera de dicha diagonal son relaciones entre los coeficientes de Poisson y los correspondientes módulos de elasticidad longitudinales. Generalmente se cumple simetría en la matriz respecto a la diagonal principal.

$$[S] = [C^{-1}] = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{13} & S_{23} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_L} & -\frac{\nu_{RL}}{E_R} & -\frac{\nu_{TL}}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{LR}}{E_L} & \frac{1}{E_R} & -\frac{\nu_{TR}}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{LT}}{E_L} & -\frac{\nu_{RT}}{E_R} & \frac{1}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{RT}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LT}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LR}} \end{bmatrix} \quad (1)$$

El comportamiento resistente de la madera es completamente diferente ante solicitaciones de tracción o compresión, variando a su vez para cada una de estas solicitaciones ante diferentes ángulos de la fibra. En la Fig. 2 se muestran los diagramas tensión-deformación habituales de tracción y compresión para las direcciones perpendicular y paralela a las fibras.



*Fig. 2. Diagrama tensión-deformación de la madera a tracción y compresión para las orientaciones paralela (0) y perpendicular (90) a las fibras (Blass y Sandhaas, 2017)*

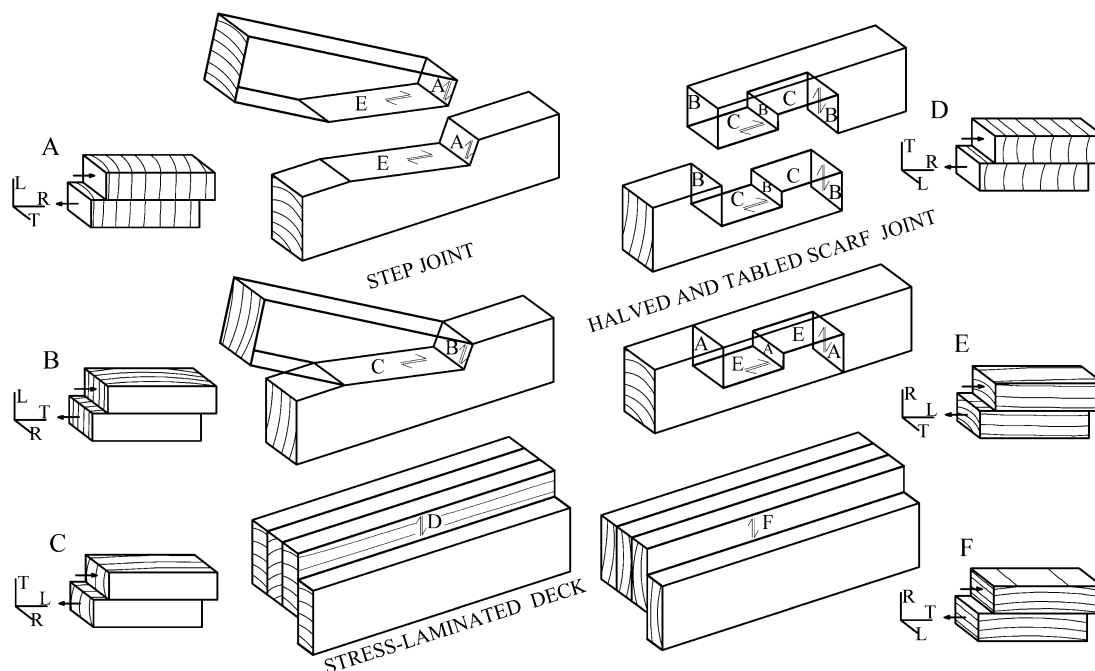
Ante esfuerzos de tracción paralela a la fibra, el comportamiento es elástico-lineal hasta alcanzar la tensión máxima, produciéndose entonces la rotura del material de forma frágil. Ante esfuerzos de compresión paralela a la fibra la madera muestra un comportamiento diferente, presentando un primer tramo elástico-lineal donde, si la tensión no cede, se producen plastificaciones por pandeo localizado de las fibras.

La respuesta de la madera ante solicitaciones perpendiculares a la fibra es similar a la que presenta ante esfuerzos paralelos pero con valores de resistencia muy inferiores. La resistencia a tracción perpendicular a las fibras es la resistencia crítica del material por la cual pueden tener lugar fallos frágiles. En cuanto al comportamiento a compresión perpendicular a la fibra, éste varía en función de la relación entre el área de aplicación de la carga y las áreas adyacentes debido a la presencia de un flujo de tensiones de tracción paralela que se oponen al aplastamiento (Argüelles-Álvarez *et al.*, 2013). El fallo en este caso se produce por plastificación.

Existen otros parámetros del material importantes en el diseño de estructuras de madera, principalmente cuando se trata del diseño de uniones tanto tradicionales como mecánicas. Estos parámetros son los coeficientes de rozamiento y las propiedades de fractura material.

En varios tipos de uniones tradicionales, las fuerzas de rozamiento son las encargadas de oponerse al deslizamiento entre los elementos que la componen (Fig. 3). Conocer los

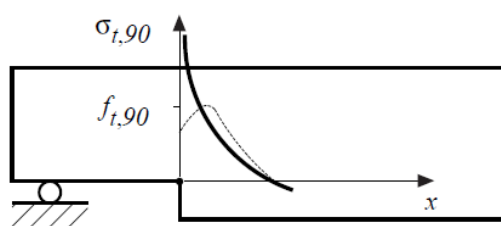
coeficientes de rozamiento de la especie resulta fundamental para una correcta simulación del encuentro entre elementos en contacto y poder así llevar a cabo un análisis preciso de su funcionamiento mecánico.



**Fig. 3.** Ejemplos de diferentes uniones tradicionales y situaciones de rozamiento asociadas (Villar et al., 2020)

Por otro lado, el conocimiento de las propiedades de fractura del material resulta de especial importancia en situaciones de diseño que, por su configuración, puedan generar un fallo frágil o hendido, siendo éste uno de los fallos más críticos en estructuras de madera. Sería el caso, por ejemplo, de uniones con medios de fijación metálicos que transfieran fuerzas con un ángulo respecto a la fibra, vigas con algún tipo de agujero para el paso de instalaciones, o vigas con un rebaje en su extremo, entre otros.

En estas situaciones existen concentración de tensiones que teóricamente tienden a infinito (Fig. 4) y que son difíciles de evaluar mediante criterios de tensiones convencionales. La determinación de la capacidad de carga de un elemento estructural de estas características es abordada mediante la aplicación de la Mecánica de la fractura.



**Fig. 4.** Concentración de tensiones en una viga con entalladura (Blass y Sandhaas, 2017)

La fractura implica la separación y por tanto la pérdida de contacto entre dos partes de un mismo sólido. Esta separación y propagación de la fisura se puede producir de tres formas diferentes dependiendo de la configuración de carga que lo produce, conocidos como Modos de fractura. Existen tres modos puros designados como I, II y III (Fig. 5), aunque también pueden existir modos mixtos dependiendo de la situación.

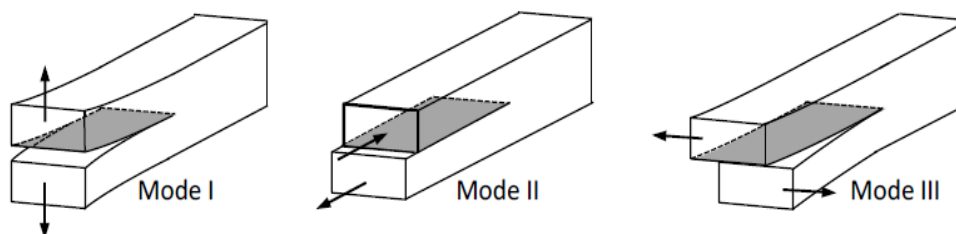


Fig. 5. Modos de fractura (Blass y Sandhaas, 2017)

El modo I está provocado por esfuerzos de tracción, los cuales originan un avance de la fisura en un plano longitudinal y normal a dicho esfuerzo. El modo II es un modo de cortante por deslizamiento donde la propagación de la fisura se produce en un plano paralelo a la dirección de los esfuerzos. El modo III es un modo similar al anterior pero produciéndose un fallo de cortante por rodadura. Los modos I y II son los más habituales en situaciones de diseño con madera.

Particularmente en el caso de diseño de uniones con medios de fijación metálicos que transfieran fuerzas con un ángulo respecto a la fibra a los elementos de madera que la componen (Fig. 6), la componente de la fuerza de tracción perpendicular podría causar un fallo frágil a niveles de carga inferiores a los definidos por los modelos dúctiles (Johansen, 1949) teniendo en cuenta la baja resistencia a tracción perpendicular a las fibras que presenta la madera.

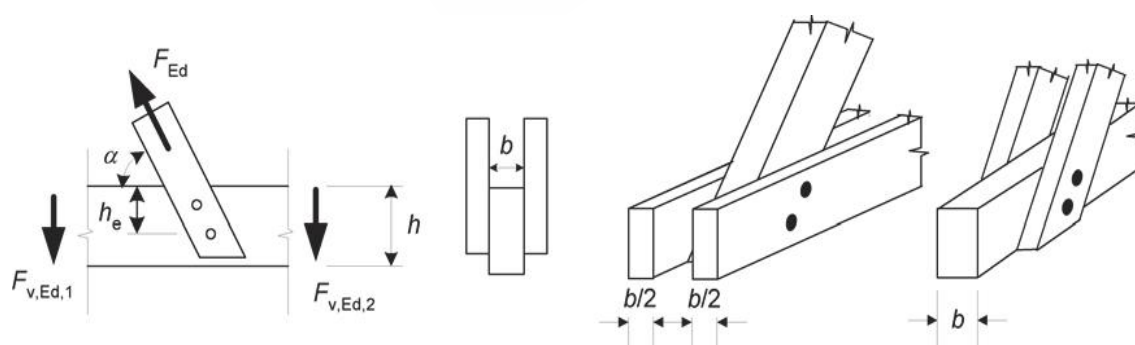


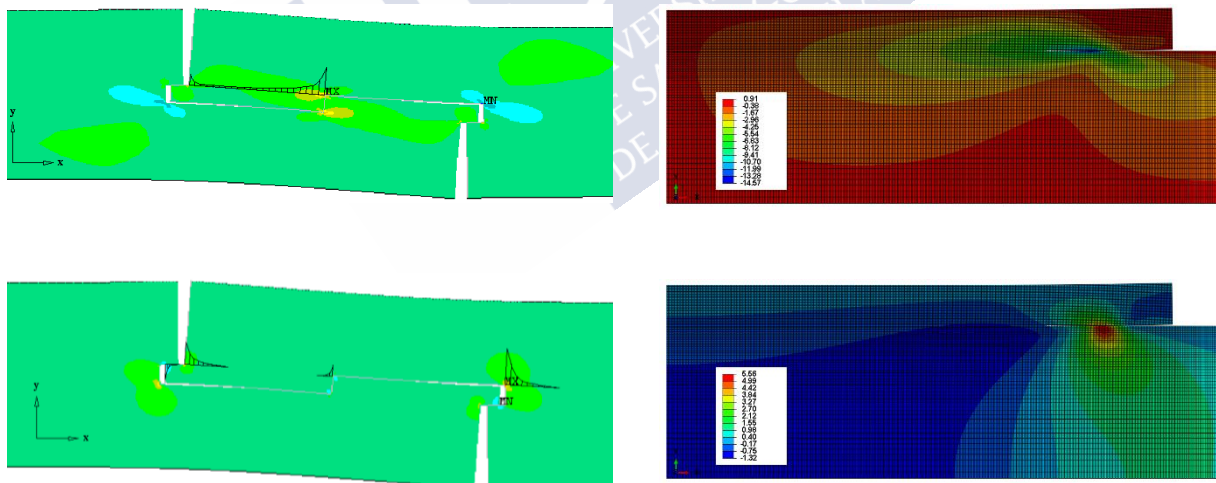
Fig. 6. Fuerza inclinada transmitida en una unión de madera con clavijas. (EN 1995-1-1:2016)

Esta situación está contemplada en el Eurocódigo 5 (EN 1995-1-1:2016). La formulación relativa para predecir dicho fallo por hendido es bastante simple, requiriendo sólo parámetros geométricos de la solución. Sin embargo, presenta algunos inconvenientes, por ejemplo la limitación de su aplicación a madera de coníferas únicamente. Dicha formulación tiene su



origen en modelos analíticos desarrollados bajo un enfoque energético en el marco de la Mecánica de la Fractura (Van der Put y Leijten, 2000) utilizando como parámetro de calibración la *Tasa crítica de liberación de energía* ( $G_c$ ) del material, obtenida de diversas investigaciones experimentales. Por tanto, resulta conveniente determinar este parámetro de fractura de las especies frondosas usadas con fines estructurales que puedan tener asociados fallos por hendido, para así poder modelizar con rigor su comportamiento mecánico.

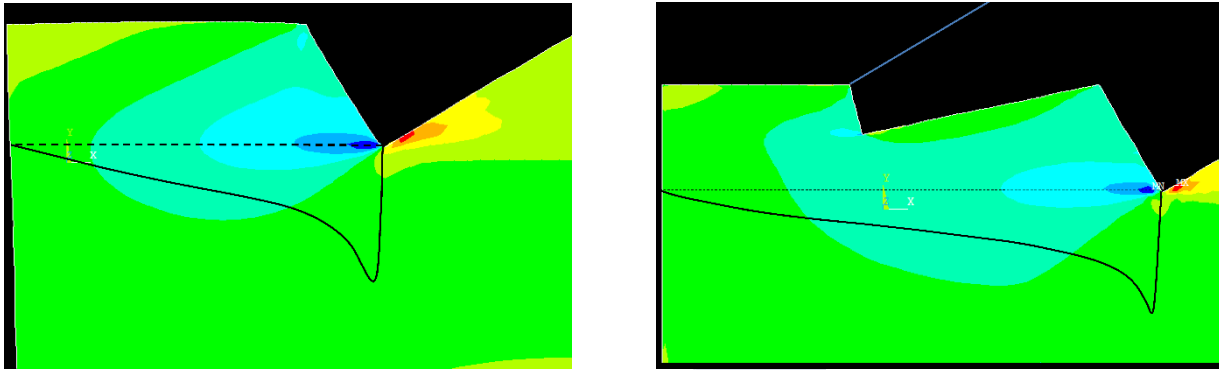
En este sentido, existen diversas investigaciones que han precisado de los parámetros de fractura y del resto de propiedades de resistencia, rigidez y rozamiento de la madera mencionados, para la simulación numérica mediante elementos finitos del comportamiento de distintos tipos de uniones. Es el caso, por ejemplo, del trabajo desarrollado por Aira *et al.* (2016), enfocado al análisis del comportamiento mecánico de la unión carpintera de empalme de llave con madera de *Pinus sylvestris* L. Para ello se desarrolló un modelo de elementos finitos considerando tensión plana y un comportamiento elástico y lineal del material (Fig. 7). Los parámetros del material utilizados para la generación del modelo fueron las propiedades de resistencia, rigidez y rozamiento madera-madera del pino. Otro análisis de este tipo de unión tradicional realizado por Aira *et al.* (2015), incorpora además la tasa crítica de liberación de energía para los modos de fractura I y II permitiendo así modelizar los mecanismos de fallo asociados. Para la modelización de la fractura se consideró una trayectoria de fisura predefinida y un comportamiento cohesivo entre las superficies de fisuración.



**Fig. 7.** Distribución de tensiones a cortante (arriba) y a tracción perpendicular a la fibra (abajo). Imágenes izquierda (Aira *et al.*, 2016) e imágenes derecha (Aira *et al.*, 2015)

Otros trabajos relacionados con el estudio de diferentes tipos de uniones tradicionales mediante simulación numérica por elementos finitos que ponen de manifiesto la necesidad de caracterizar las constantes elásticas, las propiedades resistentes y los parámetros de rozamiento de la madera son los desarrollados, por ejemplo, por Villar *et al.* (2018) y Villar *et al.* (2019). En estas investigaciones se analiza el estado tensional de la unión embarbillada entre el par y el tirante en cerchas de estructuras de madera. En particular, se analizaron dos versiones de esta

tipología de unión: embarbillado de talón y embarbillado doble (Fig. 8). En estos modelos se consideró tensión plana y un comportamiento elástico y lineal de la madera además de la ortotropía propia del material. Los parámetros de la madera utilizados para la generación del modelo fueron las propiedades de resistencia, rigidez y rozamiento de *Picea abies* (L) Karst laminada y calidad GL24h.



**Fig. 8.** Distribución de tensiones a cortante en embarbillado de talón (izquierda) (Villar et al., 2018) y en embarbillado doble (derecha) (Villar et al., 2019)

Según lo anterior, queda evidenciada la necesidad de conocer las propiedades del material mencionadas (constantes elásticas, propiedades mecánicas de resistencia y rigidez ante diferentes esfuerzos, propiedades de fractura, y coeficientes de rozamiento) en probeta libre de defectos, con el fin de desarrollar modelos numéricos precisos. Dichas propiedades no están aún definidas en literatura para el *Eucalyptus globulus* L.



## 2. OBJETIVOS

En los últimos años se están llevando a cabo importantes investigaciones con el objetivo de desarrollar nuevos productos estructurales con *Eucalyptus globulus* L. y dotarle así de un mayor valor añadido. Estas investigaciones se han apoyado mayormente en campañas experimentales utilizando especímenes de tamaño estructural. Sin embargo, en los procesos de diseño y modelado estructural y del material que impliquen el desarrollo de modelos numéricos fiables, es imprescindible que éstos contengan una completa descripción de las propiedades del material a nivel macroscópico, las cuales no están aún definidas en literatura para el *E. globulus*.

El objetivo general de la presente Tesis Doctoral es cuantificar las principales propiedades mecánicas del *Eucalyptus globulus* L. en madera libre de defectos, que resultarían necesarias en el proceso de diseño y modelado numérico de nuevos productos realizados con esta especie y sus posibles aplicaciones estructurales.

Los objetivos específicos relacionados con cada uno de los artículos de investigación que conforman este trabajo son los siguientes:

- *Artículo I:* obtener las doce constantes elásticas del *Eucalyptus globulus* L. según las diferentes direcciones de ortotropía, las cuales conforman la matriz de rigidez que caracteriza su deformación y son requeridas para una completa definición elasto-mecánica en cualquier modelo numérico: tres módulos de elasticidad longitudinal ( $E_L$ ,  $E_R$ ,  $E_T$ ), tres módulos de elasticidad transversal ( $G_{LR}$ ,  $G_{LT}$ ,  $G_{RT}$ ), y seis coeficientes de Poisson ( $\nu_{LR}$ ,  $\nu_{RL}$ ,  $\nu_{LT}$ ,  $\nu_{TL}$ ,  $\nu_{RT}$ , and  $\nu_{TR}$ ). Para su determinación se han utilizado dos procedimientos de ensayo diferentes, ultrasonidos y compresión, con el objetivo de comparar las metodologías, además de dos técnicas de medición de deformaciones: bandas extensométricas y correlación digital de imágenes (DIC, del inglés *Digital Image Correlation*).
- *Artículo II:* proporcionar resultados experimentales sobre la capacidad resistente última del *E. globulus* ante diferentes esfuerzos (tracción paralela y perpendicular a las fibras, compresión paralela y perpendicular para las direcciones radial y tangencial, cortante y flexión). Así mismo, se obtienen los módulos de elasticidad a flexión y a tracción paralela a las fibras. Estos datos permitirían simular el comportamiento elástico o elasto-plástico de la especie ante los diferentes esfuerzos en los correspondientes modelos numéricos. Un objetivo complementario de este trabajo fue determinar los coeficientes de rozamiento estático madera-madera para diferentes ángulos de orientación de las fibras (0°, 45° y 90°), parámetros fundamentales, por ejemplo, en el modelado de uniones tradicionales.

- *Artículo III:* determinar las principales propiedades de fractura en Modo I del *E. globulus* para el sistema de propagación de la fisura RL (radial-longitudinal). Se aportan las curvas de resistencia (curvas-*R*) del material, a partir de las cuales se deriva la Tasa crítica de liberación de energía ( $G_{Ic}$ ), comparando tres metodologías de tratamiento de datos diferentes. Estos parámetros del material adquieren especial importancia en diferentes aplicaciones estructurales como uniones tradicionales o mecánicas, donde pueda tener lugar un fallo frágil por hendido.



### 3. METODOLOGÍA

Para la consecución de los objetivos de esta Tesis Doctoral en cuanto a la determinación de las principales propiedades mecánicas de resistencia, rigidez, rozamiento y fractura del *Eucalyptus globulus* L. en probetas pequeñas libres de defectos, se han aplicado diferentes metodologías experimentales.

Para la realización de todos los ensayos, se ha partido de un lote de tablas cepilladas de *Eucalyptus globulus* L. procedentes de diferentes ubicaciones geográficas de Galicia y obtenidas a partir del duramen de diferentes árboles. Las tablas presentaban unas dimensiones iniciales de  $20 \times 80 \times 3000 \text{ mm}^3$ , corte radial y una clase visual tipo MEF según la norma UNE 56546 (2013), correspondiendo con la clase resistente D40 según la norma EN 1912 (2012). La densidad de las tablas fue evaluada siguiendo el protocolo indicado en la norma ISO 13061-2 (2014), obteniendo un valor medio de aproximadamente  $850 \text{ kg/m}^3$ .

En cada grupo de ensayos, se utilizaron probetas procedentes de diferentes tablas para poder tener en cuenta la variabilidad propia del material. Todas las probetas estaban libres de nudos y otras singularidades.

A continuación, se resume la información más relevante asociada a las diferentes metodologías utilizadas para la determinación de cada una de las propiedades. Dichas metodologías se organizan en grupos en función de las características de los ensayos:

ENSAYOS MECÁNICOS según protocolos normalizados (Artículos I y II):

- Ensayos de compresión: la metodología empleada para la realización de estos ensayos se recoge en la norma ISO 13061-17 (2017) para los ensayos de compresión paralela a la fibra y en la norma ISO 13061-5 (2020) para los ensayos de compresión perpendicular a la fibra. Se utilizaron probetas prismáticas con diferentes orientaciones de la fibra, las cuales permitieron determinar las constantes elásticas del *Eucalyptus globulus* L., así como las resistencias a compresión paralela y perpendicular en sus dos orientaciones (radial y tangencial). Se emplearon dos tecnologías diferentes para medir las deformaciones con el objetivo de comparar los resultados obtenidos. Por un lado, se ensayaron un total de 20 probetas para cada orientación de fibra (paralela, perpendicular radial, perpendicular tangencial y  $45^\circ$ ) utilizando galgas extensométricas con un campo de medición de aproximadamente  $3 \times 2 \text{ mm}$ ; y por otro, se ensayaron 10 probetas por cada una de las orientaciones anteriores utilizando la tecnología de correlación digital de imágenes (DIC) ARAMIS 3D de 5 MPixels, la cual permite realizar mediciones de campo completo.

- Ensayos de tracción: para la determinación de la resistencia y rigidez a tracción paralela y la resistencia a tracción perpendicular, se siguieron los procedimientos de ensayo indicados en las normas ISO 13061-6 (2014) y UNE 56538 (1978), respectivamente. Las probetas de tracción paralela presentaban forma de diábolo plano y una prolongación en los extremos para permitir su sujeción en las mordazas de ensayo. Para la medición de las deformaciones, se utilizaron técnicas ópticas DIC con el quipo ARAMIS 3D de 12 MPixels, en un área de  $50 \times 20 \text{ mm}^2$ . En cuanto a las probetas para la determinación de la resistencia a tracción perpendicular, éstas se mecanizaron con la forma específica definida en la norma, la cual permitía su acople a las pinzas de ensayo. En total se realizaron 36 ensayos a tracción perpendicular a las fibras en el plano RL y 20 a tracción paralela.
- Ensayos de flexión: para la determinación de la resistencia y la rigidez a flexión, se llevaron a cabo 22 ensayos mediante una configuración de 4 puntos de carga (2 apoyos y 2 cargas), con una luz de ensayo de 15 veces el canto de las probetas, según el procedimiento recogido en la norma EN 408 (2011). Las deformaciones en la zona central de las probetas fueron medidas con el equipo DIC, ARAMIS 3D de 12 MPixels.
- Ensayos de cortante: los ensayos para obtener la resistencia al esfuerzo cortante fueron efectuados siguiendo las indicaciones de la norma UNE 56543 (1988). En total se ensayaron 44 probetas, las cuales se sometieron a esfuerzos de cortante por deslizamiento en el plano LT. Para ello se utilizó un útil especial con capacidad de cizallamiento en un plano.

ENSAYOS CON ULTRASONIDOS (Artículo I): la tecnología de ultrasonidos se utilizó para la determinación de las 12 constantes elásticas que conforman la matriz de rigidez del *Eucalyptus globulus* L., permitiendo comparar estos resultados con los obtenidos de los ensayos de compresión mencionados anteriormente. Se ensayaron grupos de 20 probetas con 6 orientaciones diferentes según los distintos planos de ortotropía. Se utilizó el equipo Olympus Epoch 600, equipado con transductores longitudinales y transversales de 1 Mhz. Puesto que estos ensayos no se encuentran normalizados, se siguieron los procedimientos descritos por Gonçalves *et al.* (2011) y Vázquez *et al.* (2015).

ENSAYOS DE ROZAMIENTO (Artículo II): para la determinación de los coeficientes de rozamiento estático madera-madera del *E. globulus* para 3 ángulos de orientación de la fibra ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$  y  $90^\circ$ ), se siguió el procedimiento descrito por Crespo *et al.* (2011). Se realizaron un total de 130 ensayos, cada uno de ellos formado por un par de probetas con la misma orientación de fibra. Se utilizó un equipo de ensayos especialmente diseñado para tal fin, el cual consta de dos porta-probetas (uno fijo y otro móvil), una célula de carga y un peso muerto que actúa de fuerza normal. La fuerza aplicada por el peso muerto (fuerza normal) fue de 2,435 kN, la cual,

en combinación con la fuerza medida por la célula de carga hasta el inicio del deslizamiento de las probetas, permitía derivar el coeficiente de rozamiento estático.

ENSAYOS DE FRACTURA (Artículo III): se utilizó una configuración de ensayos tipo DCB (*Double Cantilever Beam*), que corresponde a un Modo I de fractura. Se obtuvieron las curvas de resistencia (curvas-*R*) en 20 probetas de *E. globulus*, de las cuales se derivó la Tasa crítica de liberación de energía del material (o energía crítica de fractura). El tratamiento de los datos se llevó a cabo aplicando tres metodologías diferentes que permitió su comparación: el método MECM (*Modified Experimental Compliance Method*), y dos enfoques diferentes del método CBBM (*Compliance Based Beam Method*), con y sin ensayos de calibración de flexibilidad previos. Estos métodos tienen en cuenta los mecanismos de daño en la zona de proceso de la fractura. Se basan exclusivamente en la flexibilidad del espécimen y aplican un concepto de fisura equivalente, por lo que no es necesaria una monitorización del crecimiento de la fisura durante el ensayo. Esto es una ventaja importante considerando la dificultad que esto supone en materiales heterogéneos como es la madera. Detalles sobre estos procedimientos se encuentran descritos en de Moura *et al.* (2008), Dourado *et al.* (2010) y Xavier *et al.* (2011).





## 4. DISCUSIÓN GENERAL

A continuación se presentan los principales resultados y discusión de los diferentes trabajos que conforman la presente Tesis, con el objetivo común de cuantificar las propiedades mecánicas del *Eucalyptus globulus* L. necesarias para su implementación en modelos numéricos.

En el artículo I se determinaron las constantes elásticas del material que conforman su matriz de rigidez y definen su comportamiento elástico. Además, la aplicación de diferentes metodologías de ensayos para este fin (ultrasonidos y ensayos a compresión utilizando dos tecnologías de medición de deformaciones diferentes: galgas extensométricas y DIC) permiten su comparativa. En la Tabla 1 se muestran los valores medios de dichas constantes elásticas obtenidas empleando cada una de las metodologías mencionadas:

**Tabla. 1.** Valores medios de las constantes elásticas del *E. globulus*. Coeficientes de variación entre paréntesis.

	Ultrasonidos	Compresión + galgas extensométricas	Compresión + DIC
<i>n</i>	20	20	10
$E_L$ [MPa]	21939 (26,30)	18055 (28,55)	25659 (22,67)
$E_R$ [MPa]	2420 (16,20)	1775 (33,49)	1820 (17,29)
$E_T$ [MPa]	1165 (33,08)	686 (31,71)	821 (50,43)
$G_{LR}$ [MPa]	1756 (15,11)	1690 (43,27)	1926 (23,98)
$G_{LT}$ [MPa]	969 (21,32)	---	---
$G_{RT}$ [MPa]	533 (28,61)	---	---
$\nu_{RT}$	0,696 (16,04)	0,688 (29,24)	0,635 (9,57)
$\nu_{LT}$	0,588 (17,60)	0,599 (36,04)	0,606 (17,11)
$\nu_{LR}$	0,452 (16,13)	0,424 (37,64)	0,448 (14,88)
$\nu_{TR}$	0,325 (20,11)	---	---
$\nu_{RL}$	0,052 (27,42)	0,036 (30,13)	0,032 (26,91)
$\nu_{TL}$	0,032 (31,60)	---	---

Comparando los resultados de los tres módulos de elasticidad longitudinal derivados de las tres técnicas de ensayo, se observa que los hallados mediante ultrasonidos así como de ensayos a compresión+DIC muestran valores superiores a los obtenidos a partir de ensayos a compresión con mediciones de deformación locales utilizando galgas extensométricas. Por tanto, estos últimos son subestimados en comparación con los derivados de los otros dos

procedimientos. Especial diferencia se observa en el módulo de elasticidad tangencial entre los ensayos de compresión con galgas extensométricas y los ensayos por ultrasonidos. Esto puede deberse a la influencia que tienen los anillos de crecimiento en las mediciones de los ensayos a compresión debido a la diferencia de propiedades entre la madera de primavera y la de verano (Gonçalves *et al.* 2011).

En el caso del módulo de elasticidad transversal  $G_{LR}$ , (único módulo de elasticidad transversal determinado por las tres metodologías empleadas), éste muestra valores muy similares independientemente de la metodología de ensayo. Así mismo, los coeficientes de Poisson del *E. globulus* presentan una gran similitud indistintamente de la técnica utilizada para su determinación.

En general, los coeficientes de variación de todas las constantes elásticas se encuentran en el rango habitual de los ensayos realizados en madera teniendo en cuenta la heterogeneidad del material.

Comparando las constantes elásticas del *E. globulus* obtenidas en este trabajo con los valores reportados por investigaciones similares en otras frondosas, como por ejemplo la llevada a cabo por Villar *et al.* (2017) utilizando *Castanea sativa* Mill. (castaño), se observa que el módulo de elasticidad longitudinal de este último es prácticamente un 50% menor que el del *E. globulus*. Los módulos de elasticidad radial y tangencial, los módulos de elasticidad transversales y los coeficientes de Poisson presentan valores similares.

Prácticamente todos los módulos de elasticidad, tanto longitudinales como transversales, obtenidos en *E. globulus* son superiores a los valores proporcionados por Guitard (1987) para frondosas con densidades medias de  $650 \text{ kg/m}^3$ . Sin embargo, las diferencias en cuanto a los coeficientes de Poisson no son tan acusadas.

Las relaciones entre los diferentes módulos de elasticidad longitudinales y transversales obtenidos de los ensayos de ultrasonidos, se encuentran más próximas a las reportadas por Guitard (1987) que las derivadas de los ensayos a compresión. Las relaciones entre los coeficientes de Poisson y los módulos de elasticidad están en los rangos definidos por Bodig & Jayne (1982) para cualquiera de las técnicas de medición utilizadas.

En el artículo II se determinaron las propiedades de resistencia y rigidez ante diferentes esfuerzos (excepto los módulos de elasticidad a compresión paralela y perpendicular ya determinados en el artículo I), así como los coeficientes de rozamiento estático madera-madera del *Eucalyptus globulus* L.

Los valores medios, número de probetas ensayado ( $n$ ), desviación típica (SD) y coeficiente de variación (CoV) se muestran resumidos en la Tabla 2:



Tabla 2. Propiedades mecánicas del *Eucalyptus globulus* L.

Propiedades mecánicas		n	Media	SD	CoV
<b>Propiedades de resistencia (MPa)</b>					
Flexión	$\sigma_m$	22	124,1	22,2	18%
Tracción paralela a la fibra	$\sigma_{t,0}$	20	176,3	39,6	22%
Tracción perpendicular a la fibra	$\sigma_{t,90}$	36	7,5	1,2	16%
Compresión paralela a la fibra	$\sigma_{c,0}$	20	73,6	13,4	18%
Compresión perp. a la fibra al límite proporcional – radial	$\sigma_{c,90,R,y}$	20	11,1	2,5	22%
Compresión perp. a la fibra a 2 mm de deformación – radial	$\sigma_{c,90,R,2}$	20	13,0	2,8	22%
Compresión perp. a la fibra al límite proporcional – tangencial	$\sigma_{c,90,T,y}$	20	10,2	4,0	39%
Compresión perp. a la fibra a 2 mm de deformación – tangencial	$\sigma_{c,90,T,2}$	20	13,6	4,4	33%
Cortante por deslizamiento	$\sigma_v$	44	16,2	3,0	19%
<b>Propiedades de rigidez (GPa)</b>					
Flexión	$E_m$	22	22,27	4170	19%
Tracción paralela a la fibra	$E_{t,0}$	20	23,80	4466	19%
Compresión paralela a la fibra	$E_{c,0}$	20	18,06	5155	29%
Compresión perpendicular a la fibra – radial	$E_{c,90,R}$	20	1,78	595	33%
Compresión perpendicular a la fibra – tangencial	$E_{c,90,T}$	20	0,69	218	32%
<b>Coefficientes de rozamiento estático</b>					
0°	$\mu_{s,0}$	44	0,08	0,04	50%
45°	$\mu_{s,45}$	43	0,20	0,08	40%
90°	$\mu_{s,90}$	43	0,24	0,09	36%

En particular, los valores medios de resistencia y rigidez a tracción en dirección paralela fueron 176,3 MPa y 23,8 GPa respectivamente, del orden de 2 veces superiores a coníferas como *Pinus silvestris* L (Baño *et al.*, 2012), lo cual demuestra el gran potencial del *Eucalyptus globulus* L. en comparación con otras especies.

En dirección perpendicular a las fibras, el valor medio de resistencia a tracción resultó ser 23 veces inferior al obtenido en dirección paralela.

En cuanto a la compresión, el valor medio de resistencia del *E. globulus* en dirección paralela fue el 42% del de tracción en la misma dirección, y el módulo de elasticidad a compresión paralela el 76% del módulo de elasticidad a tracción paralela.

En dirección perpendicular a las fibras, los valores medios de resistencia a compresión radial y tangencial resultaron ser muy similares, tanto los valores determinados al límite de

tensión proporcional (11,1 MPa y 10,2 MPa, respectivamente), como los valores determinados a 2 mm de deformación (13,0 MPa y 13,6 MPa). Sin embargo esta similitud no se produjo en los valores de rigidez de ambas orientaciones.

Los resultados de resistencia y rigidez a flexión del *Eucalyptus globulus* L. fueron 124 MPa y 22,27 GPa respectivamente. Como se puede observar, ambos valores se encuentran entre los obtenidos de los ensayos a tracción y compresión paralela. Al tratarse de probetas libres de defectos, el fallo de éstas comienza por la plastificación de la zona de compresión (menor resistencia) seguido de la rotura por tracción (mayor resistencia). Esto se debe a que cuando las fibras comprimidas comienzan a fallar, dejan de ganar capacidad de carga provocando cada vez más tensión en la zona traccionada. Comparando el *E. globulus* con otras frondosas del género *Eucalyptus*, como el híbrido *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus Urophylla* (Gherardi *et al.*, 2018) se observa que la resistencia a flexión del *globulus* es 1,7 veces superior.

El valor medio de la resistencia a cortante por deslizamiento del *Eucalyptus globulus* L. fue 16,2 MPa, representando aproximadamente el 9% de la resistencia a tracción paralela. Este valor supone prácticamente duplicar la resistencia a cortante de algunas coníferas, como por ejemplo el *Pinus nigra* Arnold (pino laricio) (Fernández-Golfín *et al.*, 2001). Además, este valor también es superior a prácticamente la totalidad de especies recogidas en Kretschmann (2010).

El coeficiente de rozamiento estático madera-madera del *E. globulus* no responde a un comportamiento lineal para los diferentes ángulos de la fibra estudiados, siendo más preciso realizar un ajuste bilineal o incluso cuadrático. El valor del coeficiente de rozamiento con un ángulo de inclinación de la fibra de 90° con relación al plano de rozamiento, resultó ser aproximadamente la mitad respecto al de *Picea abies* (L) Karst ensayado por Crespo *et al.* (2011) y al de *Castanea sativa* Mill. determinado por Villar *et al.* (2020). Por otro lado, el valor medio del coeficiente de rozamiento estático del *Pinus sylvestris* L. ensayado por Aira *et al.* (2014) resultó ser de similar valor al determinado en este trabajo de investigación para el *eucalyptus*.

Todos los coeficientes de variación de las diferentes propiedades mecánicas del *E. globulus* se encuentran dentro del rango habitual en madera.

En el artículo III de la presente Tesis Doctoral se determinaron las propiedades de fractura en Modo I del *E. globulus*. En la Tabla 3 se muestran los valores de energía crítica de fractura ( $G_{I,c}$ ) obtenidos, así como la energía crítica de fractura al alcanzar el valor de carga máxima ( $G_{I,Pmax}$ ) para cada una de las probetas ensayadas, calculados aplicando los tres procedimientos de tratamiento de datos (CBBM, CBBM-3 y MECM).

Tabla 3. Propiedades de energía de fractura en modo I del *Eucalyptus globulus* L.

	$P_{max}$ (N)	$G_{I,P_{max}}$ (J/m <sup>2</sup> )			$G_{I,c}$ (J/m <sup>2</sup> )		
		CBBM	CBBM-3	MECM	CBBM	CBBM-3	MECM
<b>Media</b>	154,3	687	644	675	720	674	691
<b>SD</b>	22,3	97	97	98	84	87	88
<b>CoV (%)</b>	14,4	14	15	15	12	13	13

El rango de la energía crítica de fractura ( $G_{I,c}$ ) del *Eucalyptus globulus* L. se sitúa entre 674 y 720 J/m<sup>2</sup>. Estos valores resultaron ser 2,7 veces superiores a los reportados para el *Pinus pinaster*, Ait. en los trabajos llevados a cabo por de Moura *et al.* (2008). La energía crítica de fractura del *Eucalyptus globulus* L es también superior a la de otras especies frondosas. Por ejemplo, Majano-Majano *et al.* (2012) obtuvieron valores medios de 401 y 485 J/m<sup>2</sup> para el *Fraxinus excelsior* L. y el *Fagus sylvatica*, L., respectivamente.

Las diferencias entre los resultados obtenidos a partir de los tres procedimientos de tratamiento de datos aplicados para determinar las curvas-*R* son mínimas. Por tanto, cuando el objetivo es obtener la energía de fractura mediante ensayos DCB, resulta recomendable la aplicación del procedimiento CBBM por su sencillez de ejecución al no requerir de ensayos previos de calibración de la flexibilidad en cada probeta, sino sólo de un único ensayo.

La energía crítica de fractura derivada de la parte horizontal de la curva-*R* ( $G_{I,c}$ ) y la calculada para la carga máxima ( $G_{I,P_{max}}$ ) presentan también valores similares. Por tanto, podría tomarse este último valor de manera práctica.

En resumen, los valores de propiedades mecánicas del *Eucalyptus globulus* L. obtenidos en los tres artículos de investigación que conforman esta Tesis Doctoral, son superiores a los de otras especies utilizadas habitualmente en el ámbito estructural, lo cual demuestra su gran potencial para nuevas aplicaciones que generen un mayor valor añadido. El conjunto de propiedades aportadas para el *E. globulus* resultan fundamentales en el proceso de diseño y modelado numérico de futuros productos realizados con esta especie y sus posibles aplicaciones estructurales, incluyendo el diseño de uniones y puntos singulares a partir de las propiedades de rozamiento y fractura.



## 5. CONCLUSIONES

### Conclusiones generales

Se aporta por primera vez una cuantificación completa de las principales propiedades mecánicas del *Eucalyptus globulus* L. en madera libre de defectos, imprescindibles tanto en fases de diseño como en el desarrollo de modelos numéricos para análisis estructural y del material.

Los resultados experimentales obtenidos ponen de manifiesto las elevadas propiedades mecánicas de resistencia, rigidez, rozamiento y fractura del *Eucalyptus globulus* L., confirmando el gran potencial de esta especie para aplicaciones estructurales, ampliando la posibilidad de explotación de esta especie como materia prima para el desarrollo de productos de mayor valor añadido.

### Conclusiones específicas

#### Artículo I:

- Los módulos de elasticidad del *Eucalyptus globulus* L. obtenidos por ultrasonidos resultaron superiores a los obtenidos mediante ensayos de compresión y galgas extensométricas utilizando las mismas probetas.
- Los módulos de elasticidad derivados de ensayos a compresión cuyas deformaciones fueron medidas por correlación digital de imágenes fueron superiores a los medidos empleando galgas extensométricas. Esto puede ser un indicativo de que las mediciones locales pueden subestimar los valores en comparación con las mediciones de campo completo.
- Las relaciones entre las diferentes constantes elásticas se encuentran en los rangos normales recogidos en la bibliografía para especies frondosas. Las relaciones determinadas por ultrasonidos son las que más semejanza presentan.
- Los valores de las constantes elásticas obtenidos, especialmente los módulos de elasticidad longitudinal y transversal, demuestran la alta rigidez del *Eucalytus globulus* en relación con las coníferas y otras especies frondosas.

*Artículo II:*

- Las propiedades de resistencia y rigidez del *E. globulus* obtenidas son elevadas, sobre todo las relacionadas con la orientación paralela a la fibra (tracción y compresión) y con la flexión.
- Las mejores correlaciones entre las propiedades de resistencia y rigidez se encontraron en flexión y en tracción paralela a la fibra. Los ensayos de compresión dieron lugar a las correlaciones más bajas entre ambas propiedades.
- La variación de los coeficientes de rozamiento estáticos respecto a diferentes ángulos de dirección de la fibra (0°, 45° y 90°) muestran una tendencia no lineal y unos resultados bajos en comparación con otras especies.

*Artículo III:*

- Los valores de energía crítica de fractura en Modo I obtenidos por los tres procedimientos de cálculo aplicados, *Modified Experimental Compliance Method* (MECM) y las dos variantes del *Compliance Based Beam Method* (CBBM), resultaron similares.
- El procedimiento CBBM resulta el más interesante desde un punto de vista práctico por su simplicidad, ya que sólo requiere la realización de un ensayo a cada una de las probetas. Por el contrario, el procedimiento MECM precisa de al menos tres ensayos previos para la calibración de la flexibilidad en cada probeta considerando diferentes longitudes de fisura iniciales.
- Los valores de energía crítica de fractura en Modo I obtenidos para el *E. globulus* en el sistema de propagación RL, resultan significativamente superiores en comparación con los de otras especies usadas habitualmente en estructuras de madera.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- Aicher, S.; Christian, Z.; Dill-Langer, G. (2014). Hardwood glulams – emerging timber products of superior mechanical properties. *World Conference on Timber Engineering (WCTE) 2014*. Quebec, Canada.
- Aira, J.R.; Arriaga, F.; Íñiguez-González, G.; Crespo, J. (2014). Static and kinetic friction coefficients of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.), parallel and perpendicular to grain direction. *Materiales de Construcción*, 64(315), e030.
- Aira, J.R.; Descamps, T.; Van Parys, L.; Léoskool, L. (2015). Study of stress distribution and stress concentration factor in notched wood pieces with cohesive surfaces. *European Journal of Wood and Wood Products*, 73(3):325–334.
- Aira, J.R.; Íñiguez-González, G.; Guaita, M.; Arriaga, F. (2016). Load carrying capacity of halved and tabled tenoned timber scarf joint. *Materials and Structures*, 49(12):5343–5355.
- Álvarez, J.G.; Balboa, M.A.; Merino, A. y Rodríguez-Soalleiro, R. (2005). Estimación de la biomasa arbórea de "*Eucalyptus globulus*" y "*Pinus pinaster*" en Galicia. *Recursos rurais: revista oficial do Instituto de Biodiversidade Agraria e Desenvolvimento Rural (IBADER)*, 1:21-30.
- Argüelles-Álvarez, R.; Arriaga, F.; Esteban, M.; Íñiguez-González, G.; Argüelles-Bustillo, R. (2013). Estructuras de Madera. Bases de Cálculo. Tomo I. Asociación de la Investigación Técnica de las Industrias de la Madera y Corcho (AITIM). Madrid, España. 570p. ISBN: 978-84-87381-44-7.
- Baño, V.; Bustillo, R. A.; Regueira, R.; Guaita, M. (2012). Determinación de la curva tensión-deformación en madera de *Pinus sylvestris* L. para la simulación numérica de vigas de madera libre de defectos. *Materiales de construcción*, 62(306):269-284.
- Blass, H.J.; Sandhaas, C. (2017). Timber Engineering. Principles for design. Karlsruher Institut für Technologie. Karlsruhe, Germany. 644p. ISBN: 978-3-7315-0673-7.
- Bodig, J.; Jayne, B.A. (1982). Mechanics of wood and wood composites. Van Nostrand Reinhold. New York, EEUU. 712p. ISBN: 0-442-00822-8.

- Crespo, J.; Regueira, R.; Soilán, A.; Diez, M.R.; Guaita, M. (2011). Desarrollo de metodología para la determinación de los coeficientes de fricción estático y dinámico de diferentes especies de madera. *CIMAD 11 – 1º Congresso Ibero-Latino Americano da Madeira na Construção*. Coimbra, Portugal.
- de Moura, M.F.S.F.; Morais, J.; Dourado, N. (2008). A new data reduction scheme for mode I wood fracture characterization using the double cantilever beam test. *Engineering Fracture Mechanics*, 75(13):3852–3865
- Derikvand, M.; Kotlarewski, N.J.; Lee, M.; Jiao, H.; Nolan, G. (2018). Flexural and visual characteristics of fibre-managed plantation Eucalyptus globulus timber. *Wood Material Science & Engineering*, 15(3):172-181.
- Derikvand, M.; Jiao, H.; Kotlarewski, N.J.; Michael, L.; Chan, A.; Nolan, G. (2019). Bending performance of nail-laminated timber constructed of fast-grown plantation eucalypt. *European Journal of Wood and Wood Products*, 77(3):421–437.
- DIN 4074-5:2008 Strength grading of Wood. Part 5: Sawn hard wood. Deutsches Institut für Normung. Germany. (In German).
- Dourado, N.; de Moura, M.F.S.F.; Morais, J.; Silva, M. (2010). Estimate of resistance curve in wood through the double cantilever beam test. *Holzforschung*, 64(1):119–126.
- EN 338:2017. Structural timber. Strength classes. European Committee for Standardization. Brussels, Belgium.
- EN 350:2016. Durability of Wood and Wood-Based Products. Testing and Classification of the Durability to Biological Agents of Wood and Wood-Based Materials. European Committee for Standardization. Brussels, Belgium.
- EN 408:2011. Timber structures. Structural timber and glued laminated timber. Determination of some physical and mechanical properties. European Committee for Standardization. Brussels, Belgium.
- EN 1912:2012. Structural timber. Strength classes. Assignment of visual grades and species. European Committee for Standardization. Brussels, Belgium.
- EN 1995-1-1:2016. Eurocode 5: Design of timber structures. Part 1-1: General. Common rules and rules for buildings. European Committee for Standardization. Brussels, Belgium.

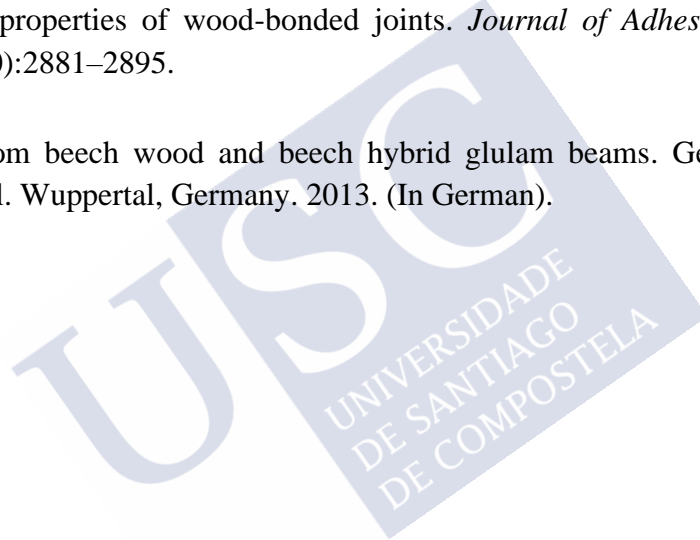


- ETA-13/0642: VIGAM – Glued laminated timber of oak. European Technical Approval. Österreichisches Instituts für Bautechnik (OIB). Titular: Elaborados y Fabricados Gamiz S.A. Sta. Cruz de Campezo, España. 2013.
- ETA-13/0646: SIEROLAM – Glued laminated timber of chestnut. European Technical Approval. Österreichisches Instituts für Bautechnik (OIB). Titular: SIEROLAM S.A. Siero, España. 2013.
- ETA-14/0354: Structural laminated venner lumber made of beech. European Technical Assessment. Österreichisches Instituts für Bautechnik (OIB). Titular: Pollmeier Furnierwerkstoffe GmbH. Creuzburg, Germany. 2018.
- Feijoo, C.E.; Armijos, D.R.; Pucha, D.A. (2018). Guía para cortes anatómicos de la madera. Universidad Nacional de Loja. Loja, Ecuador. 31p. ISBN: 978-9978-355-37-4.
- Fernández-Golfín, J.; Díez, R.; Baonza, M.; Gutiérrez, A.; Hermoso, E.; Conde, M.; Eynde, V. (2001). Caracterización de la calidad y las propiedades de la madera de Pino Laricio (*Pinus nigra* Arn. *Salzmannii*). *Investigación agraria. Sistemas y recursos forestales*, 10(2):311-332.
- Fernández-Golfín, J.I.; Díez, R.; Hermoso, E.; Baso, C.; Casas, J.M.; González, O. (2007). Caracterización de la madera de *Eucalyptus globulus* para uso estructural. *Boletín Informativo CIDEU*, 4:91–100.
- Franke, S.; Marto, J. (2014). Investigation of *Eucalyptus globulus* wood for the use as an engineered material. *World Conference on Timber Engineering (WCTE) 2014*. Quebec, Canada.
- Gherardi, P.R.; Brancheriau, L. (2018). Comparison between three-point and four-point flexural tests to determine wood strength of eucalyptus specimen. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 20(3):333–342.
- Gibson, L.J.; Ashby, M.F. (2001). Cellular solids. Structure and properties. Cambridge University Press. Cambridge, United Kingdom. 510p. ISBN: 0-521-49911-9.
- Gonçalves, R.; Trinca, A.J.; Guilherme, D. (2011). Comparison of elastic constants of wood determined by ultrasonic wave propagation and static compression testing. *Wood and Fiber Science*, 43(1):64-75.
- Guitard, D. (1987). Mécanique du matériau bois et composites. Cépadues-Editions. Toulouse, Francia. 238p. ISBN: 2-85428-152-7.

- ISO 13061-2:2014. Physical and mechanical properties of wood. Test methods for small clear wood specimens. Part 2: Determination of density for physical and mechanical tests. International Organization for Standardization. Switzerland.
- ISO 13061-5:2020. Physical and mechanical properties of wood. Test methods for small clear wood specimens. Part 5: Determination of strength in compression perpendicular to grain. International Organization for Standardization. Switzerland.
- ISO 13061-6:2014. Physical and mechanical properties of wood. Test methods for small clear wood specimens. Part 6: Determination of ultimate tensile stress parallel to grain. International Organization for Standardization. Switzerland.
- ISO 13061-17:2017. Physical and mechanical properties of wood. Test methods for small clear wood specimens. Part 17: Determination of ultimate stress in compression parallel to grain. International Organization for Standardization. Switzerland.
- Johansen, K.W. (1949). Theory of timber connections. *International Association of Bridge and Structural Engineering*, 9:249-262.
- Kotlarewski, N.J.; Derikvand, M.; Lee, M.; Whiteroad, I. (2019). Machinability Study of Australia's Dominate Plantation Timber Resources. *Forests*, 10(9):805.
- Kretschmann, D.E. (2010). Wood Handbook. Wood as an Engineering Material. Forest Products Laboratory. Department of Agriculture. Forest Service. Madison, EEUU. 508p. ISBN: 978-1484859704.
- Lara-Bocanegra, A.J.; Majano-Majano, A.; Crespo, J.; Guaita, M. (2017). Finger-jointed Eucalyptus globulus with 1C-PUR adhesive for high performance engineered laminated products. *Construction and Building Materials*, 135:529–537.
- Lara-Bocanegra, A.J.; Majano-Majano, A.; Arriaga, F.; Guaita, M. (2020). Eucalyptus globulus finger jointed solid timber and glued laminated timber with superior mechanical properties: Characterisation and application in strained gridshells. *Construction and Building Materials*, 265:120355.
- López-Suevos, F.; Richter, K. (2009). Hydroxymethylated resorcinol (HMR) and novolak-based HMR (n-HMR) primers to enhance bond durability of Eucalyptus globulus glulams. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 23(15):1925–1937.

- Majano-Majano, A.; Hughes, M.; Fernandez-Cabo J.L. (2012). The fracture toughness and properties of thermally modified beech and ash at different moisture contents. *Wood Science and Technology*, 46:5–21.
- Martins, C.; Dias, A.M.P.G.; Cruz, H. (2020). Blue gum: assessment of its potential for glued laminated timber beams. *European Journal of Wood and Wood Products*, 78:905–913.
- Pangh, H.; Hosseinabadi, H.Z.; Kotlarewski, N.; Moradpour, P.; Lee, M.; Nolan, G. (2019). Flexural performance of cross-laminated timber constructed from fibre-managed plantation eucalyptus. *Construction and Building Materials*, 208:535–542.
- Schmidt, J.; Kaliske, M. (2009). Models for numerical failure analysis of wooden structures. *Engineering Structures*, 31(2):571-579.
- UNE 56538:1978. Características físico-mecánicas de la madera. Determinación de la resistencia a la tracción perpendicular a las fibras. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). Madrid, España.
- UNE 56543:1988. Características físico-mecánicas de la madera. Determinación del esfuerzo cortante. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). Madrid, España.
- UNE 56546:2013. Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Madera de frondosas. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). Madrid, España.
- van der Put, T.; Leijten, A. (2000). Evaluation of perpendicular to grain failure of beams caused by concentrated loads of joints. *Council for Research and Innovation in Building and Construction*. Rotterdam, Netherlands.
- Vázquez, C.; Gonçalves, R.; Bertoldo, C.; Baño, V.; Vega, A.; Crespo, J.; Guaita, M. (2015). Determination of the mechanical properties of *Castanea sativa* Mill. using ultrasonic wave propagation and comparison with static compression and bending methods. *Wood Science and Technology*, 49(3):607-622.
- Villar-García, J.R.; Crespo, J.; Moya, M.; Guaita, M. (2017). Determinación de las propiedades mecánicas del castaño extremeño mediante medición de la velocidad de propagación de onda de ultrasonidos. *IX Congresso Ibérico de Agroengenharia*. Bragança, Portugal.

- Villar-García, J.R.; Crespo, J.; Moya, M.; Guaita, M. (2018). Experimental and numerical studies of the stress state at the reverse step joint in heavy timber trusses. *Materials and Structures*, 51:17.
- Villar-García, J.R.; Vidal-López, P.; Crespo, J.; Guaita, M. (2019). Analysis of the stress state at the double-step joint in heavy timber structures. *Materiales de Construcción*, 69(335), e196.
- Villar-García, J.R.; Vidal-López, P.; Corbacho, A.; Moya, M. (2020). Determination of the friction coefficients of chestnut (*Castanea sativa* Mill.) sawn timber. *International Agrophysics*, 34(1):65-77.
- Xavier, J.; Morais, J.; Dourado, N.; de Moura, M.F.S.F. (2011). Measurement of mode I and mode II fracture properties of wood-bonded joints. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 25(20):2881–2895.
- Z-9.1-679: Glulam from beech wood and beech hybrid glulam beams. German Technical Building Approval. Wuppertal, Germany. 2013. (In German).



## 7. PUBLICACIONES

### 7.1. *Artículo I: Comparative analysis of the elastic constants measured by conventional, ultrasound and 3D digital image correlation methods in *Eucalyptus globulus* Labill*

- Revista: BioResources
- Año de publicación: 2017
- Factor de impacto (JCR): 1,202
- Posición de la revista (JCR): 7/21 (Q2)
- <https://doi.org/10.15376/biores.12.2.3728-3743>

### 7.2. *Artículo II: Mechanical properties of small clear specimens of *Eucalyptus globulus* Labill*

- Revista: Materials
- Año de publicación: 2020
- Factor de impacto (JCR): 3,057 (2019)
- Posición de la revista (JCR): 132/314 (Q2) (2019)
- <https://doi.org/10.3390/ma13040906>

### 7.3. *Artículo III: Determination of the resistance-curve in *Eucalyptus globulus* through double cantilever beam tests*

- Revista: Materials and Structures
- Año de publicación: 2018
- Factor de impacto (JCR): 2,548
- Posición de la revista (JCR): 19/63 (Q2)
- <https://doi.org/10.1617/s11527-018-1209-9>